

考量預壓密之地下水管理模式之應用—以濁水溪沖積扇為例

黃全謐¹、張胤隆²、蔡東霖³

摘要

考量土壤預壓密之地下水管理模式(黃, 2009) [1] 主要有別於一般地下水管理模式常僅以水頭洩降為考量因子以推求最佳抽水量, 以一維土體壓密方程式與響應矩陣法為基礎, 並藉由導入二進位變數之技巧, 推導可同時考慮土壤彈性以及非彈性壓密之抽水量與地層下陷量關係式, 並進一步建立以最大抽水量為目標, 地層下陷量為限制條件之地下水管理模式。

本研究應用此模式於濁水溪沖積扇地區, 並依據政策以及地層下陷概況, 擬定不同之地下水管理方案, 以推求不同方案下之最大可抽水量。應用結果顯示, 本文所設定各方案中可得最大可抽水量為 4.75 億立方公尺/年, 仍無法滿足地下水環境調查及分析作業先驅規劃(水利規劃試驗所, 2007)[2]中推估之地下水需求量, 由此顯示濁水溪沖積扇過去一直面臨地下水超抽之問題, 分析成果亦顯示此管理模式於實務應用上之價值。

關鍵字: 地下水管理、地層下陷、預壓密、最佳化

The Application of Groundwater Management Model Considering preconsolidation – as an Example of Chuoshui River alluvial fan

Chuan-Yi Huang¹ Yin-Lung Chang² and Tung-Lin Tsai³

ABSTRACT

Huang (2009), through the use of one-dimensional consolidation equation and response matrix technique, the relationship between land subsidence and pumping rates is first derived. Furthermore, in order to account for the effects of preconsolidation, the binary variables are introduced into the derived equations which enable the determination of elastic or inelastic consolidations due to groundwater pumping. Base on the derived equations, a groundwater management model is developed to maximize total pumpage subject to the constraints that land subsidence do not exceed the allowable values.

The proposed management model being verified is applied to Choshui alluvial fan located in mid-west Taiwan which is facing serious land subsidence hazard due to groundwater over-pumping. Several management scenarios have been considered based on the policy, groundwater demand, and profile of land subsidence. The application results show that the maximum total pumpage to all management scenarios considered could not achieve the annual groundwater demands (Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency, 2007)[2] while reducing the land subsidence simultaneously, which indicate that the Chuoshui River alluvial fan is still facing serious problem for groundwater overpumping.

Keywords: Groundwater Management、Land Subsidence、Preconsolidation、Optimization

¹ 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 工程師

² 國立交通大學防災與水環境研究中心 博士後研究

³ 國立嘉義大學土木與水資源工程學系暨研究所 副教授

一、前言

大多數地下水管理模式皆僅考慮含水層中之水頭洩降量為限制條件來推求最大可抽水量，並未將地層下陷的影響納入地下水管理模式中加以考量，如此可能導致抽水量被高估之現象，使得決策者在利用地下水管理模式進行地下水資源之調配管理時，可能發生預期外之地層下陷災害。此外在不同含水層因其預壓密(preconsolidation)狀態之不同，亦可能因抽水而產生彈性(elastic)與非彈性(inelastic)等兩種不同之壓密行為，如此亦將對地下水管理造成困擾。

綜上所述，本文應用考量土壤預壓密之地下水管理模式(黃, 2009)[1]於台灣西部之濁水溪沖積扇地區，並依據政策以及地層下陷概況，擬定不同之地下水管理方案，以推求不同方案下濁水溪沖積扇之最大可抽水量。

二、文獻回顧

Larson et al. (2001) [3] 利用響應矩陣法建立以最大可抽水量為目標函數，地下水位為限制條件之地下水管理模式，並應用於美國加州聖喬昆谷(The San Joaquin Valley)。不同於以往之研究，其在地下水位之限制條件中加入了地層下陷之考量，即限制水頭在地下水抽取過程中，不可低於預壓密水頭(preconsolidation head)，以避免土體發生非彈性壓密之現象。然 Larson et al. (2001) [3] 僅將地層下陷之影響以定性之方式間接納入水位之限制條件中考量，並非真正地以定量之方式將地層下陷量作為狀態變數納入管理模式中考量。Chang et al. (2007) [4] 以地下水量管理為目的，利用響應矩陣法結合一維土體壓密方程式，建立以地層下陷量為限制條件之地下水管理模式，然其研究中忽略預壓密行為之影響，亦即假設土層因抽水而產生之下陷屬於非彈性壓密，並未考慮當地下水位高於預壓密水頭時可能產生之土層過壓密(over consolidation)或回漲之現象；(黃, 2009)[1]參考 Chang et al. (2007)[4]，於模式中同時考慮土壤彈性以及非彈性壓

密之抽水量與地層下陷量關係式，建立以最大抽水量為目標，以地層下陷量為限制條件之地下水管理模式。

三、理論基礎

模式以地下水量為管理目的，利用響應矩陣法結合一維土體壓密方程式，建立以地層下陷量為限制條件之地下水管理模式，並且能夠同時地考慮土體因預壓密行為造成之彈性與非彈性壓密行為，以下將對地層下陷模式以及最佳化模式之理論做一簡述。理論及模式流程如圖 1 所示。

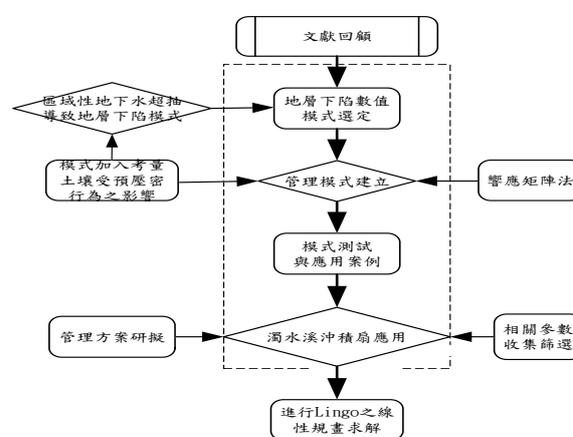


圖 1、本文地下水管理模式流程圖

3.1 地層下陷模式

本文引自(黃, 2009)[1]中參考 Jorgensen (1980) [5]、Leak (1990) [6] 土壤壓密理論，並以(蔡, 2001) [7] 所發展之「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」為基礎，對其模式中之一維土體壓密方程式進行修改以使其能考慮因預壓密水頭不同，土體分別在初次壓密與過壓密狀態下所造成之地層下陷(或回漲)量，作為計算地下水位與地層下陷變化之工具；模式中對地下水流做一近似水平流或垂直流之假設，並簡化三維耦合控制方程為非耦合之地下水流方程式與垂向一維土體壓密方程式，則一維土體壓密方程式可表示為：

$$\begin{aligned} \text{if } \Delta h(l, k, t) \geq \Delta h_p(l, k, t-1) \Rightarrow \\ \Delta s(l, k, t) = C_s \times [\Delta h_p(l, k, t-1) - \Delta h(l, k, t-1)] + \\ C_c \times [\Delta h(l, k, t) - \Delta h_p(l, k, t-1)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{if } \Delta h(l, k, t) < \Delta h_p(l, k, t-1) \Rightarrow \\ \Delta s(l, k, t) = C_s \times [\Delta h(l, k, t) - \Delta h(l, k, t-1)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta h_p(l, k, t) = \text{Max}[\Delta h(l, k, t), \Delta h_p(l, k, t-1)] \quad (3)$$

其中 $\Delta h(l, k, t)$ 與 $\Delta h(l, k, t-1)$ 分別代表 k 點第 l 層之初始水頭與 t 及 $t-1$ 時刻末水頭之差值[L]，正值代表水頭低於初始水頭，負值則代表水頭高於初始水頭； $\Delta s(l, k, t)$ 代表 $t-1$ 至 t 個管理期內控制點 k 第 l 層之實際地層下陷量[L]； $\Delta h_p(l, k, t-1)$ 與 $\Delta h_p(l, k, t)$ 分別代表 k 點第 l 層之初始水頭與 $t-1$ 以及 t 時刻末預壓密水頭之差值，正值代表預壓密水頭低於初始水頭； C_c 與 C_s 表示如下：

$$C_c = \frac{\rho_w g B(l, k)}{2\mu(l, k) + \lambda(l, k)} \quad (4)$$

$$C_s = \alpha \times C_c = \alpha \times \frac{\rho_w g B(l, k)}{2\mu(l, k) + \lambda(l, k)} \quad (5)$$

其中 α 為 C_s 與 C_c 之比值；其中 ρ_w 為水之密度 (ML^{-3})； g 為重力加速度 (LT^{-2})； B 為含水層厚度[L]； μ 與 λ 分別代表土體受剪應力 (shear Stress) 以及正向應力 (normal Stress) 作用而產生之變形率 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]。

3.2 最佳化模式

$$\text{Maximize } \sum_{j=1}^{NP} \sum_{t=1}^{NT} Q(j, t) \quad (6)$$

$$\text{Subject to } \Delta s(k) = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{NT} \Delta s(l, k, t) \leq \Delta s^*(k) \quad (7)$$

$$0 \leq Q(j, t) \leq Q^*(j, t) \quad \forall t; \forall j \quad (8)$$

其中 j 為第 j 口抽水井； NP 為總抽水井數； t 為第 t 個管理期； NT 為總管理期數； k 為模擬區域內第 k 個控制點； NC 為總控制點數； l 為第 l 個地層； L 為地層總分層數； $\Delta s(l, k, t)$ 代表 $t-1$ 至 t 個管理期內控制點 k 第 l 層之實際地層下陷量； $\Delta s(k)$ 與 $\Delta s^*(k)$ 分別為總管理期末控制點 k 之實際與允許地層下陷量； $Q(j, t)$ 與 $Q^*(j, t)$ 分別為第 j 口井於第 t 管理期之抽水量及抽水井抽水

能力 (pumping capacity)。式(6)至式(8)所組成之最佳化模式中，各抽水井之抽水量 $Q(j, t)$ 為決策變數，而地層下陷量則為狀態變數，其意義為在各控制點於總管理期末之地層下陷量皆不超過最大允許值之情況下，尋找各抽水井抽水量於時空上之分布，以使管理期末管理區域內之總抽水量為最大。

接著再依據第 3.1 節一維土體壓密方程式，建立抽水量與地層下陷量之關係式。考慮多層之地下水系統，假設含水層與阻水層中之地下水分別為水平流及垂直流 (Anderson and Woessner, 1992)[8]，且在非侷限含水層中，因抽水而導致之水位洩降遠小於飽和含水層厚度，則根據響應矩陣法之理論，各層之水頭洩降量 $\Delta h(l, k, t)$ 與抽水量 $Q(j, t)$ 間之關係可以如下之線性方程式表示：

$$\Delta h(l, k, t) = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t \beta(l, k, j, t-i+1) Q(j, i) \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (9)$$

其中， $\beta(l, k, j, t-i+1)$ 代表單位響應係數，其意義為於 t 管理期末，第 k 個控制點之第 l 層，因為抽水井 j 於 i 管理期內抽一單位水所造成之水頭洩降量。本研究中推求單位響應係數之方法為(1)令第 j 口井於第 1 個管理期之抽水量為 1 CMS，其餘抽水井之抽水量為 0；(2)利用「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」計算第 1 至第 NT 個管理期末第 k 個控制點第 l 層之水頭洩降量，則此 NT 個水頭洩降量即為第 k 個控制點第 l 層對抽水井 j 之單位響應係數 $\beta(l, k, j, t-i+1)$ ； $t=1, \dots, NT$ ；(3)重複步驟(1)與(2)求出每一抽水井對每一控制點每一層於各管理期之單位響應係數。由式(9)吾人可進一步推導第 $t-1$ 與第 t 個管理期末之水頭差為：

$$\Delta h(l, k, j, t) - \Delta h(l, k, j, t-1) = \sum_{j=1}^{NP} \sum_{i=1}^t [\beta(l, k, j, t-i+1) - \beta(l, k, j, t-i)] Q(j, i) \quad (10)$$

依據式(2)至(6)之一維土體壓密方程組，第 k 個控制點第 l 層於第 t 個管理期內之地層下陷量可改寫為如下之型式：

$$G(l,k,t) = \begin{cases} \Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) & \text{if } \Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) > 0 \\ 0 & \text{if } \Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta s(l,k,t) = C_s [\Delta h_p(l,k,t-1) - \Delta h(l,k,t-1)] + (C_e - C_s) G(l,k,t) \quad (12)$$

$$\Delta h_p(l,k,t) = G(l,k,t) + \Delta h_p(l,k,t-1) \quad (13)$$

上列方程組中，式(11)之目的在判斷第 t 個管理期時含水層之壓密行為(彈性或非彈性)，式(12)與(13)則依據式(11)之判斷結果，分別計算第 t 個管理期內之地層下陷量(或回漲量)以及進行第 t 個管理期末預壓密水頭之更新。

由於變數 G 為在原點不可微分之函數，故研究中藉由導入二進位變數並增加限制式之技巧，將原本 non-smooth optimization 之問題轉變為混合整數線性規劃 (mixed integer linear programming, MILP) 之型態，其新增之限制式可表示如下：

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - UP \times m(l,k,t) \geq -UP \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (14)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - UP \times m(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (15)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - G(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (16)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t-1) - G(l,k,t) - UP \times m(l,k,t) \geq -UP \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (17)$$

$$G(l,k,t) - UP \times m(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (18)$$

$$G(l,k,t) \geq 0 \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (19)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (20)$$

$$\Delta h(l,k,t) - \Delta h_p(l,k,t) - UP \times m(l,k,t) \geq -UP \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (21)$$

$$\Delta h_p(l,k,t-1) - \Delta h_p(l,k,t) \leq 0 \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (22)$$

$$\Delta h_p(l,k,t-1) - \Delta h_p(l,k,t) - UP \times [1 - m(l,k,t)] \geq -UP \quad \forall l; \forall k; \forall t \quad (23)$$

其中 UP 為足夠大之正數； $m(l,k,t)$ 為第 t 管理期中， k 點第 l 層之二進位變數，其值僅為 0 或 1。

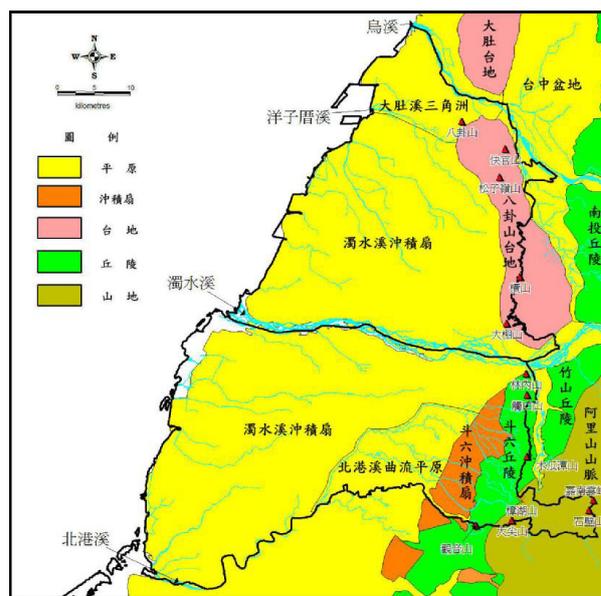
四、濁水溪沖積扇地下水管理策略研擬與模式應用

4.1 濁水溪沖積扇區域概述

4.1.1 地理位置暨水文狀況

濁水溪沖積扇位於臺灣西部海岸之中部地區，東起八卦山台地及斗六丘陵，西至臺灣海峽，北起烏溪，南至北港溪，其

範圍涵蓋彰化縣與雲林縣，面積約為 1,700 平方公里，佔濁水河流域面積的百分之六十，是臺灣本島最大之沖積扇。區域內地形雖呈東高西低之勢態，但除東邊斗六丘陵與八卦山脈外，地表平均高程僅介於 10 公尺至 55 公尺間，整體地型相當平緩。圖 2 所示為濁水溪沖積扇區域圖。



圖片來源：陳肇夏等(2000)

圖 2、濁水溪沖積扇區域圖

4.1.2 地質概況與地質分層

濁水溪沖積扇之上游(扇頂)多為礫石層，而下游(扇尾)多為砂層或泥層，除斗六丘陵及其西側為更新世半固結之砂岩、泥岩、礫岩及紅土外，本區地表均為全新世以來未固結的礫石、砂土及黏土所覆蓋。而在地層垂向分布方面，中下游丘陵及平地區域之地層分布由上而下依序為現代沖積層、台地礫岩層以及頭嵙山礫石層，三層總厚度在數百公尺以上，由於砂、礫層孔隙發達，含水性能佳，構成主要的含水層。垂向更深處則為上新世或更老之地層，主要由較緻密之砂頁岩組成，導水及含水性不佳。上游山脈大部分屬第三紀亞變質岩系板岩，含有許多複雜之褶曲與斷層，且風化侵蝕顯著，以致溪水終年混濁。板岩、變質砂岩與石英之碎屑在上游受侵蝕搬運至下游地區堆積，形成本沖積扇。

中央地質調查所[9]將濁水溪沖積扇

地表下 200 公尺深範圍內之水文地質，由上而下概念性劃分為含水層一、阻水層一、含水層二(可再細分為含水層二之 1 與含水層二之 2)、阻水層二及含水層三等共五層之地下水系統。各含水層在上游段岩性均屬礫石，並且合而為一，愈往下游分層愈趨明顯，粒徑愈細且含水層厚度漸小。於臺灣海峽中，阻水層一、二應合而為一，含水層一、二、三均尖減於阻水層中，亦即各含水層末端應是封閉的，並未與海連通，形同自然地下水庫。含水層二厚度最大，沈積物粒徑最粗，含水及透水性能較佳，是最重要之地下水層。

4.1.3 地下水使用與地層下陷概況

自 1970 年代後期起，沿海地區之養殖漁業逐漸興盛，使得地下水抽取量大幅增加。此外近年來離島工業區的開發，亦將增加對於抽取地下水之需求。根據沈向白(1991)在「濁水溪沖積扇地區地下水資源調查(含彰化縣、雲林縣)」[10]普查結果顯示，雲林縣全縣民井達近十萬口，地下水開採量約 8.0 億噸(其中農田灌溉用水約為 6 億多噸，養殖用水也約 1 億多噸)，如表 1 所列，而地下水入滲補注量約只有 4.0 億噸。張良正與龔誠山(1996)在「區域性地下水觀測站網檢討 II」[11]中亦曾對濁水溪沖積扇地下水補注量做全面之探討，其分析資料如表 2 所列。

表 1、彰化雲林地區各鄉鎮市年抽水量表

彰化縣		雲林縣	
鄉鎮市	抽水量(立方公尺/年)	鄉鎮市	抽水量(立方公尺/年)
彰化市	59276080	麥寮鄉	87000000
鹿港鎮	311000000	崙背鄉	74032242
和美鎮	2067544	二崙鄉	66501920
線西鄉	87396402	西螺鎮	44991517
伸港鄉	32333955	莿桐鄉	7059992
福興鄉	104000000	林內鄉	1040639
秀水鄉	27021093	斗六市	1718917
花壇鄉	2559806	虎尾鎮	77946183
員林鎮	21438638	土庫鎮	54948009
溪湖鎮	30737279	褒忠鄉	13865264
田中鎮	3821098	東勢鄉	20587854
大村鄉	3952847	台西鄉	45405618
埔鹽鄉	61142774	四湖鄉	42757338
埔心鄉	9161208	元長鄉	46599415
永靖鄉	18519868	大埤鄉	19180432
社頭鄉	6217525	斗南鎮	19884515
二水鄉	222929	古坑鄉	2603814
北斗鎮	39439722	北港鎮	26767062
二林鄉	111000000	水林鄉	48554009
田尾鄉	64728013	口湖鄉	25346093
埤頭鄉	53878076		
芳苑鄉	176000000		
大城鄉	12334983		
竹塘鄉	38689496		
溪州鄉	24862801		

資料來源：沈向白教授(1991年)

表 2、彰化雲林地區各鄉鎮市年入滲表

彰化縣		雲林縣	
鄉鎮市	入滲量(立方公尺/年)	鄉鎮市	入滲量(立方公尺/年)
彰化市	3510942.899	麥寮鄉	10343200.47
鹿港鎮	22589086.06	崙背鄉	30845840.55
和美鎮	20449690.52	二崙鄉	37218986.15
線西鄉	8519232.208	西螺鎮	30333942.83
伸港鄉	14380864.32	莿桐鄉	30451535.91
福興鄉	29777188.8	林內鄉	2339853.408
秀水鄉	20065661.58	斗六市	31180743.38
花壇鄉	5586218.085	虎尾鎮	26334196.82
員林鎮	7319132.841	土庫鎮	15942835.57
溪湖鎮	21603891.72	褒忠鄉	22097331.65
田中鎮	11134720.1	東勢鄉	19489810.29
大村鄉	13023998.2	台西鄉	12449723.24
埔鹽鄉	27765368.02	四湖鄉	27885965.12
埔心鄉	13237957.52	元長鄉	35047885.88
永靖鄉	14758473.73	大埤鄉	25396771.87
社頭鄉	5266015.994	斗南鎮	32360822.35
二水鄉	1445707.049	古坑鄉	10084457.63
北斗鎮	12749055.56	北港鎮	17599131.45
二林鄉	54895123.15	水林鄉	33323036.64
田尾鄉	16684620.36	口湖鄉	18855392.07
埤頭鄉	29118696.04		
芳苑鄉	35328345.14		
大城鄉	31875387.05		
竹塘鄉	25226211.18		
溪州鄉	39081717.47		

資料來源：張良正與龔誠山(1996年)

之分層處理。在地質參數設定方面，地層下陷數值模式共需要水力傳導係數、拉梅常數、土層厚度與比儲水係數等資料，根據經濟部中央地質調查所「台灣地區地下水觀測網第一期計畫—八十一，八十二，八十三年濁水溪沖積扇水文地質調查」的研究報告指出，含水層一之扇頂自由層約為 $1.93 \sim 0.4 \times 10^{-3}$ m/s，扇尾減至 $0.1 \sim 0.2 \times 10^{-3}$ m/s，而含水層二之扇頂約為 $1.93 \sim 0.4 \times 10^{-3}$ m/s，扇央與扇尾約為 $0.3 \sim 1.4 \times 10^{-3}$ m/s，含水層三之資料則付之闕如。研究中各分層與分區地質參數之設定係依據(蔡，2001)[7]之率定成果。

4.2.3 抽水井設定

由於濁水溪沖積扇地區抽水井數量繁多，而其詳細之個別抽水井位置亦難以標定，且相關研究報告及文獻中對於抽水量之分析皆以鄉鎮市為單元，因此數值模式於抽水井之處理上係將一個鄉鎮市視為一口虛擬之抽水井，並將該鄉鎮市之總抽水量平均分配於該鄉鎮市之所有格網點上，例如若某一鄉鎮抽水量為 10.0 cms，而該鄉鎮包含 10 個格網點，則每一格網點均抽水 1.0 cms。而每一虛擬抽水井(即各鄉鎮市)於不同含水層之分層抽水比例則同樣依據(蔡，2001)[7]之率定成果。

4.3 管理模式應用

4.3.1 模式設定

在管理模式設定方面，總共必須考量目標函數、決策變數、狀態變數、管理期距、控制點、不同分層土壤回漲指數 C_s 與壓縮指數 C_c 之比值 α 以及控制點初始預壓密水頭等，以下詳述各項目之設定方式。

目標函數

設定為最大可抽水量，即最大化濁水溪沖積扇所有抽水井抽水量之和。

決策變數

設定為各抽水井之抽水量。管理模式中抽水井之考量與地層下陷數值模式相同，即視單一鄉鎮市為一口虛擬抽水井，

並在計算單位響應係數時，將單位抽水量平均分配於虛擬抽水井所在鄉鎮市之全部網格點。

狀態變數

設定為各控制點之總地層下陷量(管理期末各分層下陷量總和)。

管理期距

設定為穩態之一年管理期。

控制點

本研究網格劃設共有 28×40 個格點，扣除不位於濁水溪沖積扇之外部點後，尚約有 600 個格網點，吾人並不需要將全部約 600 個格網點皆設為控制點，因其中可能包含狀況良好並不需特別管理之格點，且亦會造成響應矩陣過大以及限制式過多計算困難等缺點。本研究對於控制點數之選取係以每一鄉鎮市選取一點為原則，而控制點位置則選擇各鄉鎮市中地層下陷潛勢最高之格點，其方法為令每一鄉鎮之抽水量皆為 1.0 cms 並以「區域性地下水超抽導致地層下陷模式」模擬各網格點於 1 年後之地層下陷量，再依據模擬結果於每一鄉鎮市內選取下陷量最大之網格點做為控制點。

控制點位置之選擇除須考慮具高地層下陷潛勢地點外，亦須顧及重要建物所在之鄰近區域，以濁水溪沖積扇為言，目前較受關注而可能因地層下陷產生危害之重要建物為高速鐵路之墩柱，因此對於有高鐵通過之鄉鎮市，本研究將選擇高鐵沿線三公里範圍內，模擬地層下陷量最大之網格點做為該鄉鎮市之控制點。經由上述控制點選取之原則與步驟後，共獲得 45 個控制點，而各控制點之位置則如圖 3 所示。

土壤壓縮與回漲指數

1. 黏土(阻水層)：根據(黃，2009) [1] 參考經濟部水利署自民國 83 年度至 96 年度期間「彰雲地區地層下陷監測及分析計畫」[12] 等研究報告中，對濁水溪沖積扇 14 處地質鑽探點所進行之室內壓密試驗分析到之不同深度 C_s 與 C_c 之比值土壤 C_s 與 C_c 比值試驗資料所求出之變異係數 (coefficient of variation, COV)，皆小於 0.2，故本文

中黏土 C_s 與 C_c 之比值將採用所有實驗數據之平均值 0.15。

- 砂土(含水層)：單信瑜(1997)[13]曾針對彰化縣境內取樣之砂土進行室內壓密試驗，其試驗結果顯示所取樣砂土 C_s 與 C_c 之比值約為 0.1，故本研究中砂土 C_s 與 C_c 之比值將採用 0.1。

初始預壓密水頭

本研究中預壓密水頭之設定包含以下步驟：

- 選定記錄年限較長且資料較完整之地下水觀測網站資料，包含 189 口井。
- 依據選定地下水觀測網站[14]所記錄之歷年月平均地下水位，選擇歷史記錄中之最低水位做為該地下水觀測網站所在網格點之預壓密水頭。
- 利用距離倒數法 (inverse distance weighted, IDW) 分別對預壓密水頭以及現況地下水位進行空間內插，得到管理區域內各網格點之現況地下水位與預壓密水頭。
- 由於缺乏詳細各分層之地下水觀測資料，因此本研究將步驟(3)所獲得各控制點之預壓密水頭依據分層之厚度，將其等比例地分配至每一分層中。

4.3.2 管理方案研擬

前小節中已定義管理模式各項目之意義，吾人尚須決定決策變數(各井抽水量)與狀態變數(各控制點地層下陷量)之限制值始能進行求解。依據過去地下水使用以及地層下陷之概況，本研究將濁水溪沖積扇劃分為特定區(高鐵沿線 3 公里範圍內與嚴重地層下陷區)、管制區(公告之地下水管制區但不含前述之特定區)以及其他區(非屬特定區與管制區者)等三區域，並研擬以下不同之管理方案：

(a) 各井抽水量上限固定方案

根據地下水管制辦法，位於地下水管制區之鄉鎮市，其鄉鎮內抽水井之抽水量，除了主管機關因應上級政府輔導各目的事業之政策需要，而對於原合法取得水權重新調配引水者外，不得申請增加抽水量。上述規定僅適用於地下水管制區內，然為了避免地下水資源過度開採之可能

性，本方案限定濁水溪沖積扇之所有鄉鎮市其抽水量均不得超過該鄉鎮市現行之抽水量，然由於各鄉鎮市現行實際之抽水量並無詳細資料記載，因此本研究假設各鄉鎮市之抽水量上限值如表 1 所示，亦即各鄉鎮市抽水量不可超過民國 79 年之調查結果。在各鄉鎮市抽水量上限決定後，根據各控制點所在位置不同，地層下陷量允許上限值則有以下之考量：

- 特定區：位於特定區之控制點代表已有嚴重地層下陷之情形發生或鄰近高鐵行經路線，故此區域之控制點於 1 年管理期末之地層下陷最大允許值為零。
- 管制區：控制點於管理期末之地層下陷最大允許值為 1 公分。
- 其他區：位於其他區控制點之地層下陷最大允許值由 1 公分開始逐步增加至 5 公分，以探討其與最大可抽水量之關係。

(b) 其他區抽水井抽水量可增加方案

本方案目的在探討當位於非特定區與管制區之鄉鎮市其抽水量上限可提高時，是否能對最大可抽水量帶來顯著之變化。在此方案下，位於其他區之各鄉鎮市其抽水量上限值將由表 1 民國 79 年所調查之值開始，由 110% 逐步增加至 200%。另外在控制點允許地層下陷量方面，位於特定區與管制區之控制點其 1 年管理期末之地層下陷最大允許值設定為與方案(a)相同，而其他區控制點於 1 年管理期末之地層下陷最大允許值則設為 3 公分。上述兩方案之設定詳如表 3 所列。

表 3、濁水溪沖積扇模式設定表

目標函數	最大可抽水量，即 45 個鄉鎮市抽水量之和。	
決策變數	45 個鄉鎮市之抽水量(每一鄉鎮市為一虛擬抽水井)。	
狀態變數	各控制點總地層下陷量。	
控制點	45 個，如圖 3。	
管理期	穩態，管理期距為 1 年。	
限制條件	決策變數	(a) 上限均不得超過表 1，下限為零。 (b) 位於特定區與管制區之鄉鎮市上限不得超過表 1，下限為零，其餘鄉鎮市上限由表 1 所載之 110% 增加至 200%。
	狀態變數	(a) 特定區控制點最大允許值為零；管制區最大允許值為 1 公分；其他區最大允許值由 1 公分逐步增加至 5 公分。 (b) 特定區控制點最大允許值為零；管制區最大允許值為 1 公分；其他區最大允許值為 3 公分。

五、應用結果與討論

依據前述之模式設定，本節將分別利用 Chang et al. (2007)[4]所發展僅考慮非彈性壓密之管理模式以及(黃，2009)[1]之管理模式計算濁水溪沖積扇之最大可抽水量。圖 4 所示為方案(a)最大可抽水量與其他區控制點最大地層下陷量允許值之關係，觀察圖 4 可發現，隨著其他區地層下陷量最大允許值之提高，最大可抽水量亦相對提高；另外在不同管理模式之計算結果方面，圖 4 顯示考慮土壤預壓密狀態下之最大可抽水量較僅考慮非彈性壓密者約增加 0.25 億立方公尺/年，兩者間並未有非常明顯之差異，其原因在於濁水溪沖積扇過去長年地下水超抽，僅近年來始逐漸加強地下水管制，因此地下水位回升之幅度尚屬有限。然根據地下水環境調查及分析作業先驅規劃(水利規劃試驗所，2007)[2]中推估民國 93 年間之地下水需求量 19.50 億立方公尺/年。以方案(a)而言，在抽水量不可超過民國 79 年調查資料之條件下，其他區在允許下陷量為 5 公分時，管理模式之計算結果為年可用水量=4.66 億立方公尺，而 Chang et al. (2007)[4]所發展管理模式之計算結果則為 4.4 億立方公尺，兩者皆無法滿足 19.5 億立方公尺之需求量。

圖 5 所示為方案(b)最大可抽水量與其他區各鄉鎮市抽水量上限增加百分率之關係圖，由圖 5 可知當增大方案(a)所設定之抽水量至 200%時，本研究所發展管理模式之計算結果為 4.75 億立方公尺/年，較方案(a)增加約 3%，顯示在本應用案例所設定之地層下陷限制條件下，增加其他區鄉鎮市抽水井之抽水上限尚能小幅度地增加最大可抽水量，因此方案(b)相較於方案(a)具有控制點地層下陷量小且最大可抽水量稍高之優點。依據方案(b)中增大抽水量至 200%時之計算結果，濁水溪沖積扇年地下水可用水量約為 4.75 億立方公尺，仍無法滿足地下水之需求量。

綜整(a)、(b)兩方案之分析結果以及近年來濁水溪沖積扇之地下水需求量與地層下陷量調查資料可發現，即使將其他區鄉鎮市之抽水量上限增加至民國 79 年調查

值之 200%，在符合所設定之允許下陷量條件下，最佳之總抽水量仍無法滿足實際之需求量，顯示近年來部分鄉鎮市實際之抽水量可能已遠大於民國 79 年調查值，亦凸顯濁水溪沖積扇地下水超抽以及嚴重地層下陷之問題。基於減緩(或防止)地層下陷危害持續發生以及水資源永續利用之考量，相關管理單位或決策者更應思考如何以其他水資源替代方案或非工程措施等管理策略來降低濁水溪沖積扇之地下水需求量。

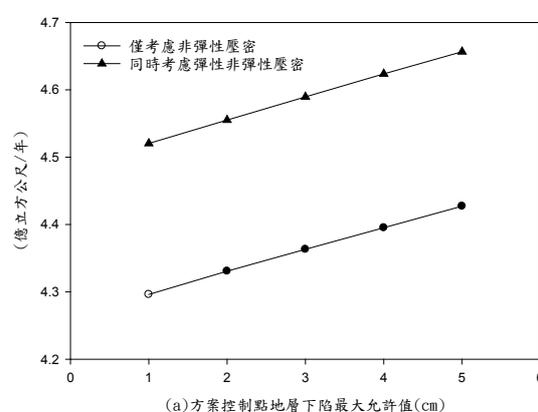


圖 4、方案(a)最大可抽水量與控制點地層下陷最大允許值關係圖

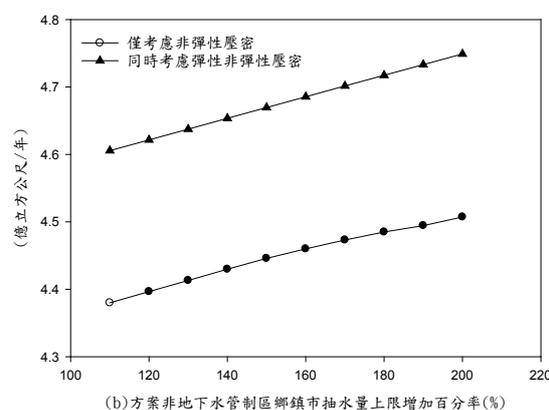


圖 5、方案(b)最大可抽水量與其他區抽水量上限關係圖

參考文獻

1. 黃全謚，考量預壓密之地下水管理模式之建立與應用，碩士論文，國立交通大學，2009。
2. 能邦科技顧問股份有限公司，地下水環境調查及分析作業先驅規劃(1/2)，經濟

- 部水利署水利規劃試驗所，2007。
- 2005。
3. Larson, K. J., Basagaoglu, H., and Marino, M. A. "Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model." *Journal of Hydrology*, 242(1-2), 79-102, 2001
 4. Chang, Y. L., Tsai, T. L., Yang, J. C., and Tung, Y. K. "Stochastically optimal considering groundwater management land subsidence." *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 133(6), 486-498, 2007.
 5. Jorgensen, D. G. (1980). "Relationships between basic soils-engineering equations and basic ground-water flow equations." US Geological Survey Water Supply Paper 2064. US Geological Survey, Washington. USA.
 6. Leake, S. A. "Interbed Storage Changes and Compaction in Models of Regional Groundwater-Flow." *Water Resources Research*, 26(9), 1939-1950, 1990.
 7. 蔡東霖，區域性地下水超抽導致地層下陷模式之發展與應用，博士論文，國立交通大學，2001。
 8. Anderson, M. P., and Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling : simulation of flow and advective transport*, Academic Press, San Diego.
 9. 經濟部中央地質調查所全球資訊網 <http://www.moeacgs.gov.tw/main.jsp>
 10. 沈向白，「濁水溪沖積扇地區地下水資源調查(含彰化縣、雲林縣)」，台灣省水利局，1991。
 11. 張良正，龔誠山，「區域性地下水觀測站網檢討(II)—濁水溪沖積扇觀測站網佈井及觀測頻率檢討」，經濟部水資源局，1996。
 12. 經濟部水利署，「台灣地區 94 年度地層下陷監測井新建及其相關試驗分析」，
 13. 單信瑜，「台灣西部地層下陷地區淺層土壤變形之研究」，第二屆地下水資源及水質保護研討會，台灣，1997。
 14. 經濟部水利署地下水觀測網站。
<http://pc183.hy.ntu.edu.tw/index.php>